일본의 극저온냉동기 및 응용 기술 연구개발 현황

Masao Shiraishi, 장호명
Thermal Engineering Division, Mechanical Engineering Laboratory, Japan,
홍익대학교 기계공학과

1. 서 론

이 글에서는 현재 일본의 기업, 대학, 연구소에서 진행되고 있는 극저온 냉동기와 그 응용기술에 대한 연구개발 현황을 개괄적으로 기술하고자 한다. 이를 위하여 우선 일본에서 관심을 가지고 있는 극저온 냉동기의 종류와 그 응용분야를 설명하고, 이들에 대한 연구 개발이 진행중인 기관들을 소개하도록 하겠다. 그 중에서 특히 일부 주요 기업의 개발 현황과 향후 전망을 약간 상세히 살펴본 후, 마지막으로 필자가 재직중인 일본 기계연구소(Mechanical Engineering Laboratory)에서 진행되고 있는 연구 내용을 간단히 소개하도록 한다.

일반적으로 극저온용 냉동 (refrigerator)는 냉동용량이 수 kW급 또는 그 이상인 대형냉동기(large scale refrigerator)와 수 W 또는 수십 W급인 소형 냉동기(small scale refrigerator)로 구분할 수 있는데, 특히 이 소형냉동기를 극저온냉동기(cryocooler)라고 부른다. 대형냉동기는 실험용 핵융합로(nuclear fusion reactor) 등의 대규모 냉각시스템에 이용되기는 하지만, 이 글에서는 소형 극저온냉동기를 주로 다루기로 한다.

극저온냉동기는 사이클의 열역학적 구성 Stirling냉동기, 맥동관(pulse tube)냉동에 따라 GM(Gifford-McMahon)냉동기, 기, 흡착(sorption)냉동기, JT (Joule-Thomson)

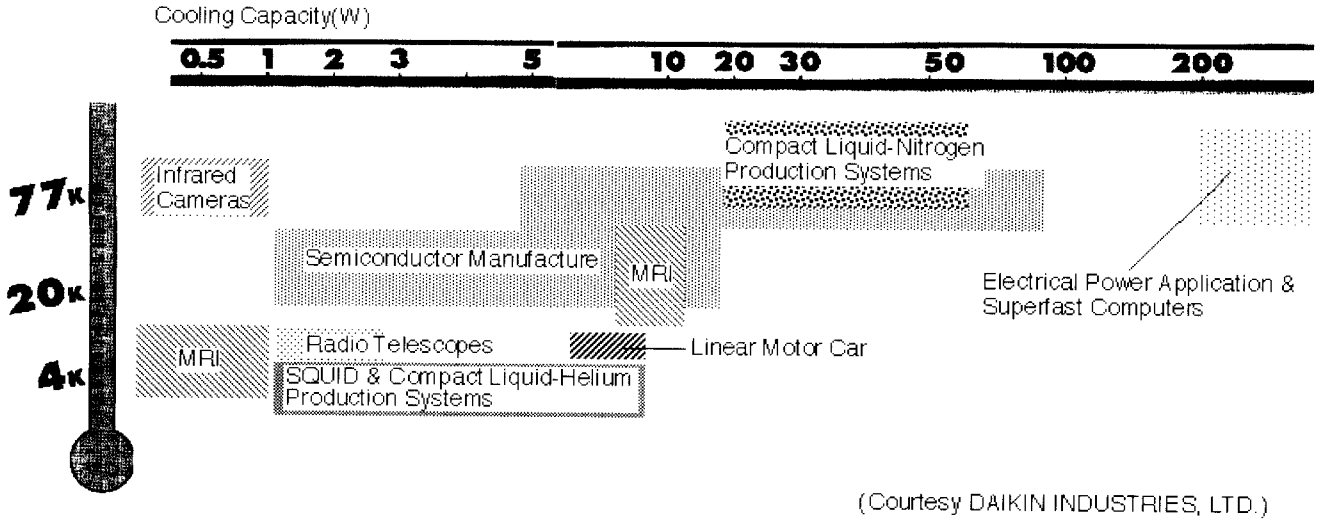

그림 1. 온도-냉동용량에 따른 주요 응용분야

Fig. 1. Application areas on temperature-cooling capacity diagram

2. 냉동기 분류 및 응용분야

냉동기 등 매우 다양한 종류가 있다. 그 중에서 일본의 연구기관들이 가장 많은 관심을

표 1. 대표적인 기관들의 최근 연구분야
Table 1. Recent main research area of representative organizations

Organizations	GM	Stirling	Pulse Tube	Thermo-acoustic
Company				
ASIAN SEIKI Co., Ltd	○	○	○	
Cryodevice			○	
Daikin industries, Ltd	○	○	○	
Iwatani International Corp.	○		○	
Sumitomo Heavy Industries, Ltd	○	○	○	
Air Water Inc.(Daido Hoxan Inc.)				
Toshiba Corp.				
Suzuki Shokan Co. Ltd				
University				
Aichi University of Education				○
Nagoya University	○			
Nihon University			○	○
Okayama University of Science			○	
Osaka City University				○
Tokyo Institute Technology	○			
University of Tsukuba			○	○
Waseda University			○	
Laboratory				
Electrotechnical Laboratory (ETL)		○		
Mechanical Engineering Laboratory (MEL)			○	
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)			○	
National Space Development Agency of Japan (NASDA)				

갖고 있는 냉동기로는 GM냉동기, Stirling냉동기, 맥동관냉동기라고 할 수 있다. GM냉동기는 현재 상업적으로 가장 널리 사용되는 극저온냉동기라고 할 수 있다. 일본에서는 자성물질을 열재생 재료로 사용하여 이미 1990년대에 초반에 액체헬륨 온도인 4 K에 도달하였다. Stirling냉동기는 고효율과 소형이 요구되는 분야에 사용되고 있다. 최근에 가장 많은 관심을 갖고 있는 냉동기는 맥동관 냉동기라고 할 수 있다. 저온의 운동부가 없으므로 제작이 간단하고 운전의 신뢰성이 가장 높다.

일본에서 관심을 갖고 있는 극저온냉동기의 응용분야로는 다음과 같이 약 다섯 가지 영역으로 요약할 수 있다. 그림 1은 냉동온도와 냉동용량의 범위에 따른 응용분야를 도시하였다.

이미 1980년대부터 생산되는 GM냉동기들은 진공 생성을 위한 극저온 진공펌프에 사용되고 있다. 보통 20 K이하의 극저온 표면에 잔류기체를 응고시켜 고진공을 생성한다.

(2) 센서 냉각

극저온냉동기는 다양한 극저온용 센서를 냉각하는 시스템에 응용되는데, 그 중에서도 특히 적외선 감지기(infrared detector)와 초전도 양자간섭기 SQUID (superconducting quantum interference device)가 가장 대표적이라고 할 수 있다.

(3) 의료진단

일본에서도 의료진단용으로 널리 사용되고 있는 자기공명영상 MRI(magnetic resonance imaging) 기기의 냉각이 극저온 냉동기의 가장 중요한 응용분야이다.

(4) 초전도 전자장비

최근에 많은 관심을 갖게 된 분야이며, 특히 이동통신용 고온초전도(HTS) 필터의

냉각시스템이 가장 대표적인 응용분야이다.

(5) 기타 분야

그 밖의 응용분야로는 극저온수술(cryosurgery)이나 장기보존(organ preservation)과 같은 극저온 생물학 분야 나 저온 반도체전자(cold semiconductor electronics) 분야를 들 수 있다.

3. 주요 연구기관 및 연구분야

3.1. 연구기관

일본에서 극저온냉동기에 관한 연구를 수행하는 기관을 기업, 대학, 연구소로 분류하고 각 연구기관에서 관심을 갖고 있는 냉동기의 종류를 표1에 나타내었다. 극저온냉동기를 생산, 판매하거나 연구개발 중인 대표적 기업의 수는 최소한 8개이다. 초기에 이 기업들이 가장 많이 연구, 개발한 냉동기는 GM냉동기였으나 최근에는 모두 맥동관 냉동기에 더욱 많은 관심을 갖고 있다. 극저온냉동에 관한 연구를 수행하는 대학의 수도 최소한 8개 정도이다. 대학에서도 가장 많은 연구의 대상이 맥동관 냉동기술이라고 할 수 있으며, 최근에 일부 대학에서는 열음향(thermoacoustic) 냉동기술에 관한 학술논문을 발표한 바 있다. 연구소로는 Electrotechnical Laboratory(ETL)에서 Stirling냉동기술에 관한 연구를, 그리고 High Energy Accelerator Research Organization(KEK)와 Mechanical Engineering Laboratory(MEL)에서 맥동관 냉동기술에 대한 연구를 수행하고 있다.

3.2. 맥동관냉동기 개발

현재 일본에서 진행중인 저온냉동에 관한 연구, 개발 주제 중에서 가장 중요한 부분은 맥동관냉동기라고 할 수 있다. 맥동관냉동기의 개발은 제1세대, 제2세대, 제3세대로 구분할 수 있는데, 각 세대별 맥동관의 변화를 그림 2에 도식적으로 나타내었다.

제1세대 맥동관냉동기는 기본 맥동관(basic pulse tube)으로 부르는데, 그림과 같이 좌측에 상온의 압축기에 재생기(regenerator)가 연결되어 있으며, 그 우측이 맥동관이 위치하고 있다. 맥동관의 좌측에 냉동을 수행하는 저온열교환기가, 우측에 열을 방출하는 고온열교환기가 각각 위치한다. 압축기가 우측으로 이동하여 기체를 압축하면 맥동관에서 기체도 우측으로 이동하면 압축되고 반대로 좌측으로 이동하면서 팽창한다. 따라서 맥동관 내에 기체의 압력과 질량유량의 변화는 기본적으로 같은 위상각(phase angle)을 갖고 있다.

제2세대 맥동관은 오리피스 맥동관(orifice pulse tube)으로 맥동관의 고온측에 일종의 유동저항인 오리피스를 통해 저장소(reservoir)와 연결되어 있다. 이 구성에서는 저장소와 오리피스의 영향으로 맥동관 내에 기체의 질량유량은 압력과 위상차를 갖고 왕복하는데, 이 위상각의 차이는 보통 90도 이하이다. 오리피스 맥동관은은 기본형에 비해 더 많은 냉동용량과 더 낮은 냉동온도를 얻을 수 있다.

제3세대 맥동관은 오리피스 맥동관에 다양한 변형을 취한 형태인데, 현재까지도 매우 많은 연구개발이 이루어지고 있다. 특히 가장 대표적인 형태가 이중입구 맥동관(double inlet pulse tube)으로 그림과 같이 열재생기 고온부와 맥동관 고온부를 밸브로 연결한 구성이다. 또 다른 형태로 관성관 맥동관(intertance tube pulse tube)이 있는데, 이는 오리피스 맥동관의 오리피스 대신 매우 긴 관을 유동저항으로 사용하는 형태이다. 이러한 구성에서 맥동관 내부에서 기체의 질량유량과 압력의 왕복 위상각 차이는 90도 이상이 되도록 설계된다. 그밖에도 상온부에서 기체가 외부에 일을 하는 고온팽창기(warm expander), 4개의 밸브 및 능동형 완충공간(active buffer) 등을 활용하는 다양한 연구가 진행되고 있다.

3.3. 상업용 냉동기 현황

현재 일본에서 생산 및 판매되는 냉동기 중에서 대표적인 몇 가지의 사양을 표2에 나타내었다. Aisin사는 Stirling형 또는 GM형 맥동관냉동기를 생산하는데 주로 액체질소 온도 영역의 냉동기들이다. 이들은 주로 적외선 센서나 HTS필터 시스템 등에 사용되고 있다. 또 Cryodevice사에서는 차세대 이동통신인 IMT-2000의 냉각장치에 사용할 수 있도록 70 K에서 약 6W의 냉동용량을 가진 맥동관냉동기가 개발되어 있다.

일본의 대표적인 공기조화기(air-conditioner) 생산업체인 Daikin사에

서도 다양한 극저온냉동기가 생산되고 있다. 소형 Stirling냉동기는 80 K에서 5 W급으로

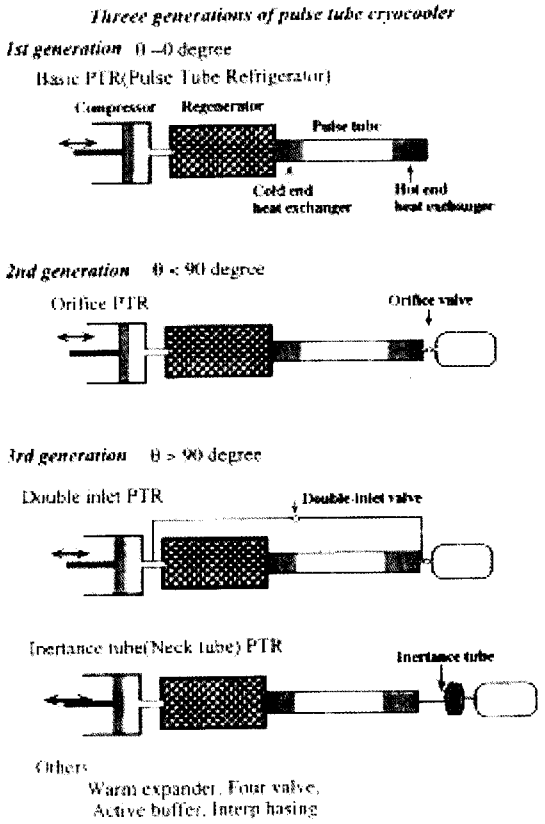

그림 2. 3세대별 맥동관냉동기의 구성
Fig. 2. Three generations of pulse tube cryocooler configuration

천체망원경의 냉각에 사용되고 있다. 이 냉동기는 소형이며 고효율을 그 특징으로 하고 있다.

Iwatani사는 산업용 기체를 생산, 판매하는 기업인데, 다양한 용량의 GM 및 맥동관 냉동기를 생산하고 있으며, 이 중 GM냉동기는 주로 질소의 액화용으로 이용되고 있다. 초소형인 77 K에서 2 W급인 맥동관냉동기는 진동이 전혀 없고 장기수명 및 고 신뢰성을 그 특징으로 하고 있다.

Sumitomo중공업에서도 다양한 극저온 냉동기를 생산하는데, 그 중에서 액체헬륨 온도인 4 K에서 운전되는 GM냉동기가 가장 대표적이다. 이 냉동기의 열재생 물질로는 4~8 K에서 비열이 큰 $ErNi_{0.9}Co_{0.1}$을 사용하고 있다. 2단형으로 제2단은 4 K에서 1 W, 제1단은 40 K에서 37 W의 냉동능력을 갖고 있어서 소형 (저온)초전도마그네트의 냉각에 적합하다. 이 냉동기는 부착각도에 무관하며, 손쉬운 운전과 소형화 및 경량화가 특징이다. 또 고온초전도 시스템이나 질소 액화 시스템에 응용이 가능한 77 K에서 12 W급의 맥동관 냉동기도 판매를 시작하고 있다.

3.4. 향후 전망

일반적으로 일본 극저온냉동기 생산은 세 가지 면에서의 발전을 추구할 것으로 생각한다. 그 중 첫째는 고신뢰성(high reliability)이며, 둘째는 고효율(high efficiency)이고 셋째는 저비용(low cost)이다. 여기에서 신뢰성에는 온도의 안정성, 긴 운전시간, 저 진동, 부착각도의 영향 등이 포함될 것이다.

그리고 향후 극저온냉동기의 시장 중에 가장 중요한 분야는 통신용 고온초전도(HTS) 필터의 냉각으로 예상하고 있다. 이 냉각시스템에 대한 요구사항을 정리해보면 대체로 다음과 같다. 냉동용량은 70 K에서 약 5 W규모이며, 소비동력이 200~300 W 이상을 초과하지 않아야 할 것이다. 유지보수의 면에서는 5년이상의 연속운전이 가능해야 하고 무게는 20 kg 정도이며, 가격은 대당 $1,000 이내로 제작되어야 경제성이 있을 것이다.

4. 맥동관의 유동가시화 연구

맥동관의 냉동성능을 향상시키기 위해서는 맥동관 내부에서 유체의 유동현상을 이해하는 것이 매우 중요하다. 예를 들어, 맥동관은 중력장 하에서 놓이는 각도에 따라 냉동성능이 크게 달라진다. 1997년 Thummes 등은, 2 Hz로 운전되는 기본 맥동관의 경우, 고온이 위로 수직일 때 최저 도달온도가 약 45 K으로 가장 낮고, (수직선과의) 각도가 증가할수록 최저 온도가 서서히 증가한다고 보고하였다. 특히 이 각도가 약 80도(즉, 거의 수평)이상이 되면 냉동온도가 80 K이상으로 크게 증가하고 이 각도가 140도 정도가 되면 최저온도가 약 170 K에 이르러

표 2. 대표적인 상업용 극저온냉동기의 사양
Table 2. Specifications of some commercial cryocoolers

Manufacturer	Model	Cooler type	Cooling capacity	Lowest temperature	Cooldown time	Weight	Power consumption	Applications
Aisin	SPR 05	ST	8W@77K	50 K	10 min	18 kg	100V 300W	
	PR111	GM	5W@80K	56 K	12 min	36.5 kg	100V 800W	
Cryodevice		PT	6W@70K					HTS Filter
Daikin	WE-5000A	ST	5W@80K			7.5 kg	100V 130W	Telescope
	WE 1000A	ST	1W@80K		7 min	2.3 kg	24V 30W	Telescope
Iwatani	D840	GM	40W@77K 8W@20K	10 K				N_2 Liquefaction
	M310	GM	10W@77K 1W@10K	6 K				N_2 Liquefaction
	S050	GM	50W@77K	20 K				N_2 Liquefaction
	CryoMini	PT	2W@77K	55 K				
Sumitomo Heavy Industry	SRDK-408D	GM	37W@40K 1W@4.2K	3.2 K		18 kg	200V 7500W	
		PT	12W@77K	41 K				HTS systems N_2 Liquefaction

냉동효과가 거의 없어지는 것으로 보고한 바 있다. 이러한 현상들을 설명하고 이해하기 위하여 일본의 기계연구소(Mechanical Engineering Laboratory)에서는 맥동관

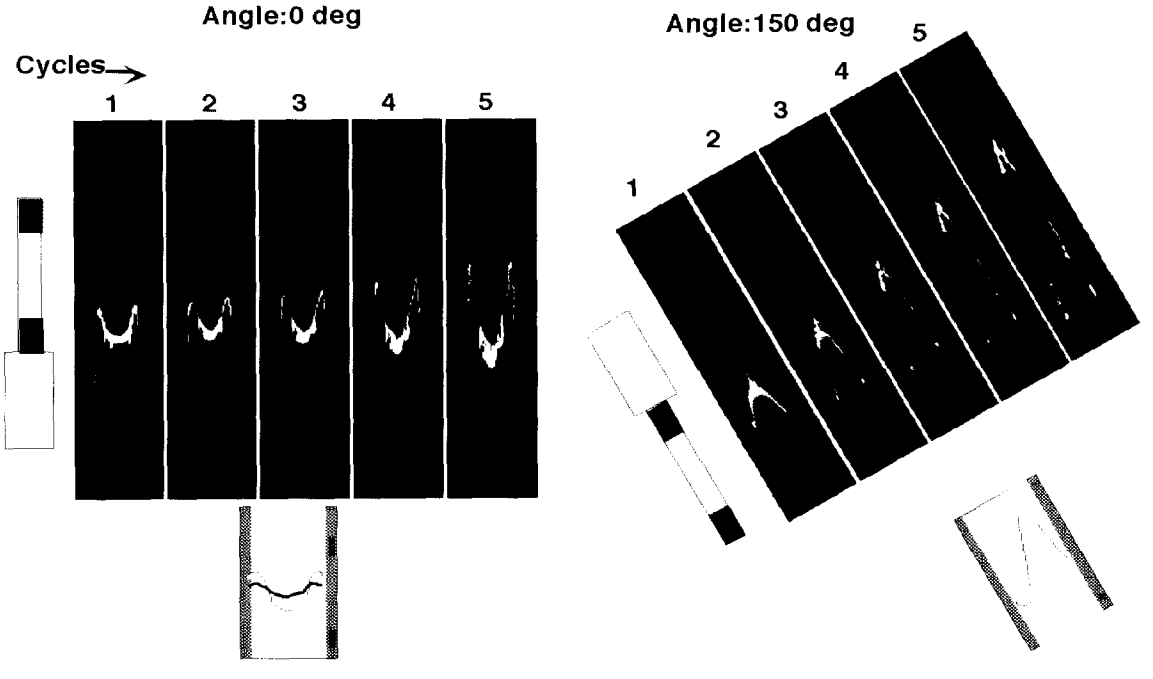

그림 3. 맥동관의 각도가 0도와 150도일 때, 5사이클 동안 연기선의 유동가시화
Fig. 3. Flow Visualization of smoke-line for 5 cycles when the pulse tube angles are 0 and 150 degrees

내에서 유동가시화(flow visualization)에 대한 연구를 수행하고 있다.

맥동관 내에서 기체의 유동은 단순히 축방향으로 왔다 갔다 하는 왕복유동(oscillating flow)에 추가하여 소위 2차유동(secondary flow)을 포함하고 있다. 2차유동은 기체가 관의 중심(center) 근처와 벽(wall) 근처 사이의 운동을 의미한다. 즉 기체는 축방향으로 일직선상에 왕복운동을 하는 것이 아니라 타원 모양의 궤적을 그리면서 왕복유동을 하는 것이다.

이러한 현상을 시각적으로 관찰하기 위하여 맥동관의 한 단면에 연기선(smoke-wire)를 설치하고 고속카메라를 통하여 주기적으로 연기선이 변화하는 모양을 촬영하는데 성공하였다. 그림 3은 맥동관과 수직선이 이루는 각도가 0도(고온부가 윗 쪽)와 150도 인 두 가지 경우에 대하여, 사이클이 반복되면서 연기선이 변화하는 모양을 나타내고 있다.

각도가 0도로 위가 고온, 아래가 저온인 경우에는 열적으로 안정되어, 기체가 벽 쪽으로 상승하였다가 중심 쪽으로 하강하는 형태의 2차유동을 나타내고 있다. 그러나 각도가 150도로 위가 저온, 아래가 고온인 경우에는, 반대로 기체가 중심쪽으로 상승하였다가 벽쪽으로 하강하는 2차유동을 나타내고 있다. 이 차이는, 후자의 경우 자연대류(natural convection)의 영향이 포함되어 있기 때문이다. 최근에는 이중입구 맥동관의 경우에 대한 유동가시화에도 성공하여 그 결과를 국제학술대회에서 발표하였다.

5. 결 론

지난 해 11월에는 한국초전도저온공학회(KIASC)와 일본저온공학회(CAJ) 사이에 협력각서(MOU)가 조인되었다. 이제 두 학회는 응용초전도와 저온공학의 발전을 위하여 다양한 방법의 공동 노력을 취하게 될 것이다. 이번에 일본의 극저온냉동기 연구개발에 대한 현황을 소개하는 기회를 갖게 되어 매우 기쁘게 생각하며, 앞으로 저온공학 분야에서 두 학회 회원간에 더욱 활발한 교류가 있기를 희망한다.

참고문헌

[1] "극저온 냉동 및 응용기술 세미나", 국제냉동기구(IIR) 한국위원회 A1(저온물리학, 저온공학) 분과 및 공기조화 냉동공학회 극저온냉동 분과 공동 주최, 한국가스공사 연구개발원 후원, KIST 국제회의실, 2000년 5월 25일

저자이력

Masao Shiraishi
1947년 1월 2일생, 1969년 Hiroshima University 물리학과 졸업, 1971년 동대학원 물리학과 이학석사, 1976년 동대학원 물리학과 이학박사, 현재 일본 기계연구소(Mechanical Engineering Laboratory) Chief, hermal Engineering Division

장호명 (張鎬明)
1960년 9월 21일생, 1983년 서울대학교 공과대학 기계공학과 졸업, 1984년 Uni. of Michigan 기계공학과 졸업 (공학석사), 1988년 M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology) 기계공학과 졸업 (공학박사), 1990년~현재 홍익대학교 기계공학과 교수